

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02115

研究課題名(和文) 酸化物量子井戸構造に誘起される新奇な2次元電子液体とその機能

研究課題名(英文) Novel two-dimensional electron liquid states in quantum well structures of strongly-correlated oxides

研究代表者

組頭 広志 (KUMIGASHIRA, Hiroshi)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：00345092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：酸化物量子井戸構造内に閉じ込められた強相関電子が示す「金属」量子化状態(2次元電子液体)においては、軌道選択的量子化や巨大ラッシュバ効果などの興味深い現象が発現する。本研究では、高輝度放射光による「みる」技術と酸化物分子線エピタキシーという「つくる」技術を高いレベルで融合することで、酸化物量子井戸構造内のスピン・軌道・量子化状態を可視化し、その知見に基づいた酸化物量子井戸構造の設計を行った。さらに、酸化物量子井戸構造内で誘起される新奇な2次元電子液体の機能探索を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高輝度放射光を用いた先端計測と物質設計を組み合わせた本研究により、酸化物量子井戸構造で発現する低次元電子液体とその機能との相関関係を特定した。これにより、手探りで進められている酸化物新奇量子現象の探索に明確な指針を与えることができたと考えられる。電荷・スピン・軌道の直接観測に基づいた物質設計・機能探索を行った本研究は、「先端計測に基づいた物質開発・新機能創製」の先駆けとなる特色のある研究であり、酸化物デバイス研究のみならず、将来的により広範囲の物質開発に大きく貢献できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The quantum confinement of strongly correlated electrons in artificial structures has heralded the possibility of tailoring the extraordinary physical properties of strongly correlated oxides, such as orbital selective quantization and the giant Rashba effect. This research project aimed to design novel physical properties that appear at the quantum-well structures of strongly correlated oxides by combining the state-of-the-art synchrotron-radiation spectroscopic analysis with the fabrication techniques of oxide quantum-well structures. We explored the functions of novel two-dimensional electron liquid states induced in oxide quantum-well structures and designed these structures based on these results.

研究分野：酸化物表面界面物性

キーワード：量子井戸構造 酸化物ヘテロ構造 角度分解光電子分光 放射光 バンド構造 酸化物エレクトロニクス 機能性ナノ構造 酸化物薄膜

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ヘテロ界面や酸化物量子井戸構造を用いた強相関電子の量子閉じ込めが、強相関電子の振る舞いを制御する有効な手法として注目されている。近年の特筆すべき報告として、1. バンド絶縁体である LaAlO_3 と SrTiO_3 との界面における高移動度 2 次元電子状態[1]と超伝導[2]の出現、2. SrTiO_3 の表面における金属量子化状態の形成[3]と、3. その巨大（異常）ラッシュバ効果の発現[4]、4. SrVO_3 量子井戸構造における軌道選択的量子化と異常有効質量増大効果[5]、等が挙げられる。これらの量子機能の出現は、通常の半導体・金属の常識では考えられないことであり、強相関酸化物に特有の新しい量子化現象であると考えられる。

この酸化物量子井戸構造において発現する 2 次元電子状態の機能を探索するためには、これらの量子化状態における電子・スピン・軌道状態をあるがままの形で正確に観測し、その知見に基づいて新たな量子機能を設計することが極めて重要である。このような背景のもと、申請者らの研究室では、作製した酸化物量子井戸構造において発現する 2 次元電子状態をその場 (*in-situ*) で高輝度放射光を用いた角度分解光電子分光 (ARPES) により調べることで「*in-situ* ARPES-レーザー分子線エピタキシー (MBE) 複合装置」の建設・改良を進めてきた。本装置を KEK-フォトンファクトリー (PF) の偏光切り替えビームラインに常設・運営することで、原子レベルで構造を制御した酸化物量子井戸構造を作製し、その場でその量子化状態を可視化できるシステムを構築している。これを用いて、これまでに伝導性酸化物 SrVO_3 を用いた量子井戸構造 ($\text{SrVO}_3/\text{SrTiO}_3$) に閉じ込められた 2 次元電子液体 (2DEL) が奇妙な量子化状態を示すことを *in-situ* ARPES で明らかにしている [5]。さらに最近、この強相関酸化物量子井戸構造における、伝導性酸化物層の 2 次元極限における量子臨界点の出現[6]や多重量子井戸構造における量子干渉効果の存在を示す興味深い結果を得ている。そのため、酸化物量子井戸構造で発現する新奇な 2DEL 状態の学理を構築し、その知見に基づいた量子機能設計が必要とされている。

2. 研究の目的

酸化物量子井戸構造内に閉じ込められた強相関電子が示す「金属」量子化状態 (2 次元電子液体) において、軌道選択的量子化や巨大ラッシュバ効果などの興味深い現象が報告されており、酸化物量子井戸は新たな機能探索のプラットフォームとして近年注目されている。本研究では、当研究室で培ってきた高輝度放射光による「みる」技術と酸化物分子線エピタキシーという「つくる」技術を高いレベルで融合することで、酸化物量子井戸構造内のスピン・軌道・量子化状態を可視化し、その知見に基づいて酸化物量子井戸構造を設計する。これにより、酸化物量子井戸構造内で誘起される新奇な 2 次元電子液体の機能探索を行うことを目的とする。具体的には、レーザー MBE 法を駆使して原子レベルで構造を制御した酸化物量子井戸構造を作製し、その中で誘起される 2 次元電子液体の量子化状態を、その場で放射光を用いた偏光 ARPES によりスピンと軌道の情報にまで分離して正確に把握し、その知見にもとづいた構造設計を行う。これにより、酸化物量子井戸構造で発現する新奇な 2 次元電子液体状態の解明およびその機能探索を行う。

3. 研究の方法

酸化物量子井戸構造を作製し、*in-situ* での ARPES 測定を行うためには、レーザー MBE 装置と光電子分光装置を超高真空下で連結した複合装置が必要である。そのため、本研究ではこれを可能とする「*in-situ* ARPES + レーザー MBE 複合装置」の建設・改良を行い、さらには放射光を用いた偏光依存測定を行うための 5 軸マニピレーターを設計して導入した。この装置を用いて、原子レベルで構造を設計・制御した強相関酸化物量子井戸構造を作製し、その電子状態を *in-situ* で解析した。特に、本研究においては、「量子化状態を電荷・スピン・軌道に分離して可視化」するために、放射光を用いた偏光依存 ARPES 測定可能な基盤整備を行った。具体的には、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 放射光施設 Photon Factory (PF) の表面・界面解析ビームライン BL2A MUSASHI (Multiple Undulator beamline for Spectroscopic Analysis on Surface and HeteroInterface) の建設・調整を行い、エンドステーションとして本複合装置を設置するこ

とで、偏光（垂直、水平、右円、左円）切り替えの ARPES 測定を可能にした。また、レーザー MBE 法で作製した原子レベルで平坦な表面に K および H 吸着を利用した電子ドープを行うことで模擬的な電荷蓄積層を形成し、強相関酸化物の表面・界面電子状態のキャリア依存性を調べるために、試料準備槽に金属蒸着源や試料加熱機構を導入した。

4. 研究成果

本研究の目的は、原子レベルで構造を制御した「強相関酸化物量子井戸構造」を設計・作製し、量子井戸ポテンシャル内に閉じ込められた強相関電子の振る舞いを ARPES により可視化することで、新奇な低次元電子状態をデザインすることにある。本研究課題では、電界効果トランジスタ (FET) 構造のチャネル層に相当する酸化物表面に誘起される 2DEL 状態と、伝導性酸化物 SrVO₃ と酸化物半導体である SrTiO₃ をベースとした量子井戸構造内の 2DEL 状態とにターゲットを絞って研究を行い、下記の成果を得た。

1) K 吸着による Anatase TiO₂ (001) 表面の 2 次元電子状態制御

アナターゼ型酸化チタン (a-TiO₂) 表面は、光触媒機能を示すことでよく知られている。近年、この a-TiO₂ の表面極近傍に光照射により電気伝導層が形成されることが報告[7]され、透明電極としての応用が期待されている。これら表面における新機能創製のためには、その発現機構を基礎的な電子状態から理解することが非常に重要となる。しかしながら、a-TiO₂ 表面における電子状態、特にその 2DEL 状態についてはよく分かっていない。そこで、機能発現の舞台である表面電子状態を明らかにし、a-TiO₂ 表面機能に関する知見を得ることを目的として、レーザー MBE 法を用いて原子レベルで平坦な a-TiO₂ 試料表面を作製し、その上に K を吸着させ電子ドープすることで表面に 2DEL を形成させ、その様子を *in situ* ARPES で決定した。

図 1 に a-TiO₂ (001) 清浄面における K 吸着前後での *in situ* ARPES 測定結果を示す。a-TiO₂ (001) 清浄面では表面酸素欠損に由来したフェルミ面を構成する伝導帯が存在する。さらに K 吸着に伴って、このフェルミ面のフェルミ波数 (k_F) が增大していることが見て取れる。このことは、表面に吸着した K が電子ドナーとして働き、a-TiO₂ (001) 表面に電子をドープしていることに対応していると考えられる。さらに、K 吸着後において明瞭なサブバンド構造が形成されることから、ドープされた電子は a-TiO₂ (001) 表面で量子閉じ込めを受けていることが示された。詳細な解析の結果、ドープされた電子は表面近傍 1-2 nm の領域に閉じ込められていること、2次元キャリア密度 (n_{2D}) の増加に伴ってポーラロニックな伝導からフェルミ流体に変化することが明らかになった。これらのことから、K 吸着により 2 次元的な金属状態を形成し、その 2DEL 状態を制御可能であると結論づけた[8]。

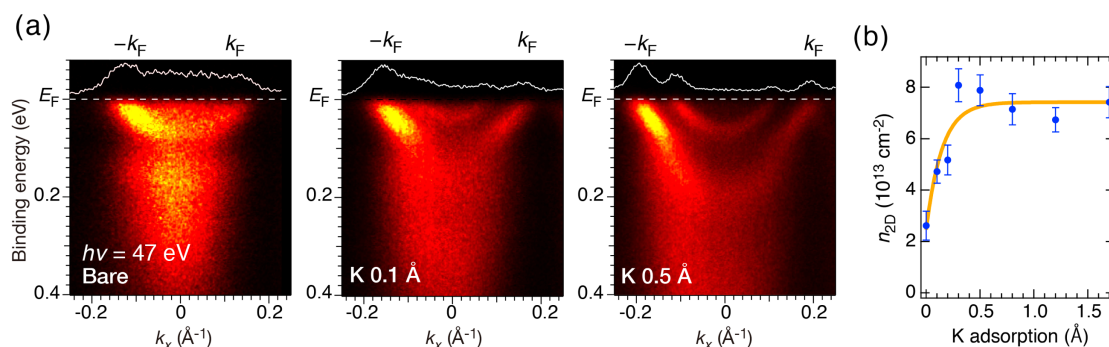


図 1. (a) K 吸着における a-TiO₂ (001) 表面の ARPES イメージと (b) 2 次元キャリア密度の K 吸着量依存性

また、この吸着 K により表面領域に電子ドープされた状態が FET 構造のゲート電圧下におけるチャネル層の振る舞いと類似していることが明らかになってきた。そのため、この表面吸着 K 法を酸化物半導体 ZnO、SnO₂、BaBiO₃ 等に展開し、FET 構造のチャネル層（酸化物界面）の 2 次元電子状態形成メカニズムを明らかにした。また、得られた知見を元に表面 2DEL 状態の制御指針を確立した。

2) 表面キャリア注入した VO₂ 表面における単斜晶金属相の出現

二酸化バナジウム (VO_2) は室温付近で V イオンの二量化による構造相転移を伴った金属-絶縁体転移 (MIT) を示す。近年、イオン液体を用いた FET である電気二重層トランジスタ構造 (EDLT) を用いたキャリア注入により、 VO_2 の MIT が制御可能であることが報告され、基礎研究のみならずデバイス応用の観点から注目されている [9]。しかしながら、その MIT 変調メカニズムについては未だ議論が続いている。そこで本研究では、このキャリア誘起 MIT の発現機構を電子状態及び結晶構造の観点から明らかにするために、 VO_2 薄膜表面に K 原子を蒸着することで FET 構造と同様の表面キャリア注入を実現し、その場 (*in-situ*) での軟 X 線分光測定を行った。

図 2 (a) に、 VO_2 薄膜 (MIT 温度: $T_{\text{MI}} \sim 295 \text{ K}$) におけるルチル型金属相 ($T = 320 \text{ K}$) 及び単斜晶系絶縁体相 ($T = 250 \text{ K}$) の価電子帯スペクトルを示す。MIT に伴って、フェルミ準位 (E_{F}) 上にギャップが形成されている。この絶縁体相の薄膜表面に K 原子を蒸着するとフェルミ端が出現する [図 2 (b)] ことから、K 蒸着により絶縁体相 VO_2 薄膜が金属化したことが分かる。さらに、この K/VO_2 薄膜は、150 K で再び絶縁体へ転移することから、 T_{MI} が 150–250 K まで抑制されていることが分かった。これらの結果から、K からの表面キャリア注入により、 K/VO_2 薄膜においては EDLT と類似したキャリア誘起 MIT が実現していると結論した。

次に、キャリア誘起 MIT の起源を構造相転移の観点から明らかにすることを目的として、偏光依存 X 線吸収分光 (XAS) 測定を行った。単斜晶系 VO_2 では、V イオンの二量化に伴って新たに形成された反結合性 $d_{||}^*$ 状態が、酸素 K 端 XAS スペクトルの直線偏光二色性 (LD) として観測されることが知られている。そのため、この LD を利用して K/VO_2 薄膜の構造相転移に関する評価を行った。その結果、K 蒸着後の K/VO_2 において、図 2 (b) に示す光電子分光の結果から 250 K で電子状態が金属化しているにもかかわらず、 $d_{||}^*$ 状態が観測された。このことは、 K/VO_2 におけるキャリア誘起金属相が、単斜晶系 VO_2 に特有の V イオンの二量化を維持した状態であることを示している。さらに、この「単斜晶系金属相」は、降温により単斜晶系絶縁体相 (150 K) へ、昇温によりルチル型金属相 (320 K) へと転移した。これらの結果から、キャリア注入された VO_2 では、単斜晶系絶縁体相とルチル型金属相との境界付近に新たな相である「単斜晶系金属相」が出現することを見いだした [10]。

3) VO_2 量子井戸構造における膜厚依存 MIT: パイエルスとモット不安定性の競合

VO_2 における量子閉じ込め効果について調べるために、膜厚を制御した $\text{VO}_2/\text{TiO}_2(001)$ 量子井戸構造を作製し、その電子構造と結晶構造 (V-V 二量化) 変化について調べた。この構造においては、V 鎖が面直方向に伸びることになるため、膜厚の低下と共にパイエルス不安定性が減少する事が期待される。その結果、 VO_2 は 2 nm までは厚膜 (バルク) の特性を維持するが、その後 MIT 転移が不明瞭になり、臨界膜厚 1.0–1.5 nm で膜厚依存 MIT を示すことを明らかにした。また、臨界膜厚以下においては、V-V 二量化は起こらずルチル型絶縁体相をとることが明らかになった。これらの結果から、次元性の低下と共にモット不安定性がパイエルス不安定性に対して優勢になるため VO_2 層の 2 次元極限においてはモット絶縁体相であるルチル型絶縁相が安定すると結論づけた。

4) 基板面方位を制御した SrVO_3 量子井戸構造の軌道選択的量子化

酸化物量子井戸構造を用いた強相関電子の量子閉じこめにおいては、その異方的な 3d 軌道を

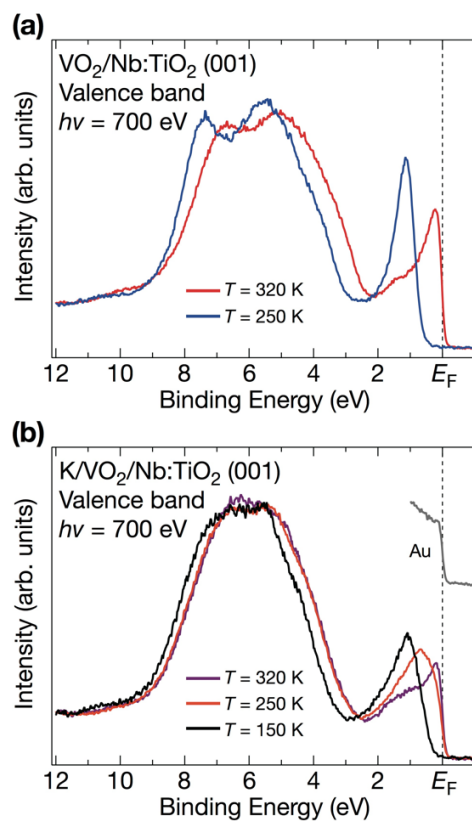


図 2. (a) $\text{VO}_2/\text{Nb}:\text{TiO}_2(001)$ 薄膜における金属相と絶縁体相及び (b) K 蒸着後の価電子帯スペクトル

反映して閉じ込め方向と軌道の幾何学的配置により量子化状態が異なる「軌道選択的量子化」という興味深い現象が起こる。そのため、SrVO₃量子井戸構造における軌道選択的量子化現象を明らかにすることを目的として、面方位の異なる SrVO₃薄膜および量子井戸構造を作製し、*in situ*での偏光依存 ARPES[11]を行なった。

図3に SrVO₃(110)量子井戸構造における膜厚 10 ML の SrVO₃(110)極薄膜における *in situ* 偏光依存 ARPES 測定の結果を示す。水平偏光 (LH) で測定した結果 (図3 (a)) において、V 3d の d_{xy} 軌道由来のサブバンド構造 (量子化状態) が明確に観測されていることがわかる。SrVO₃(001)量子井戸構造の結果[5]との比較から、これらのサブバンド構造は高結合エネルギー側から量子数 $n = 1, 2, 3$ の量子化状態に帰属される。一方、垂直偏光 (LV) で測定した d_{yz}/d_{zx} 軌道由来のバンド構造においては、 d_{xy} 軌道の様な顕著な量子化状態は観測されていない (図3(b))。これらの結果から、SrVO₃(110)量子井戸構造においては、閉じ込め方向に対する軌道の対称性を反映して、 d_{xy} バンドと d_{yz}/d_{zx} バンドとでは異なる量子化状態が実現していることを明らかにした。詳細な解析の結果、強相関電子のコヒーレンス長が量子化の有無に密接にかかわっていると結論づけた。

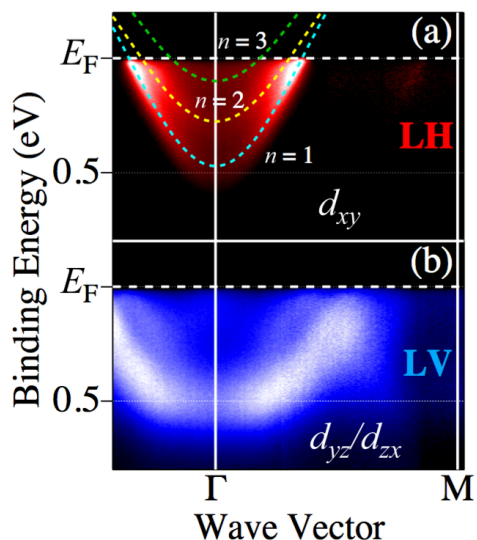


図3 SrVO₃ (10ML)/ SrTiO₃(110)量子井戸構造におけるΓ-M 方向の *in situ* 偏光依存 ARPES 強度プロット。(a) LH および(b) LV で得られた結果

4) 二重量子井戸構造における量子干渉効果の検証

量子井戸間の量子干渉効果について調べるために、SrVO₃上部量子井戸 (QW1) /SrTiO₃ (バリア層) /下部量子井戸 (QW2) という二重量子井戸 (DQW) 構造を作製し、その量子化状態を *in-situ* ARPES で調べた。その結果、SrTiO₃絶縁バリア層で隔てられた SrVO₃金属量子井戸内の量子化状態がお互いに干渉している様子を明らかにした。また、この干渉効果は SrVO₃の量子化準位位置および SrTiO₃絶縁バリア層の膜厚により制御できることを見いだした。さらに、これらの実験結果がバンド計算の結果とよい一致を示すこと、つまり量子干渉効果により説明できることを明らかにした。これにより、二重量子井戸構造を用いた強相関電子の波動関数の設計指針を確立した。また、単体では絶縁体である 2 分子層 (2 ML) の SrVO₃量子井戸 (SrVO₃ (2 ML) /SrTiO₃基板) が SrVO₃ (2 ML) /SrTiO₃ (2 ML) /SrVO₃ (6 ML) の DQW においては、下部量子井戸からの量子干渉によって金属的になる様子を観測した。このことから、量子化状態間の近接効果を用いて MIT が誘起できる可能性を見いだした。

<引用文献>

- [1] A. Ohtomo and H.Y. Hwang, *Nature* **427**, 423 (2004).
- [2] N. Reyren *et al.*, *Science* **317**, 1197 (2007).
- [3] A.F.Santander-Syro *et al.*, *Nature* **469**, 189 (2011).
- [4] A.F.Santander-Syro *et al.*, *Nat. Mater.* **13**, 1085 (2014).
- [5] K. Yoshimatsu and H. Kumigashira *et al.*, *Science* **333**, 319 (2011).
- [6] M.Kobayashi and H. Kumigashira *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 16621 (2017).
- [7] S. Moser *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 196403 (2013).
- [8] R. Yukawa and H. Kumigashira *et al.*, *Phys. Rev. B* **97**, 165428 (2018)
- [9] M. Nakano *et al.*, *Nature* **487**, 459 (2012)
- [10] D. Shiga and H. Kumigashira *et al.*, *Phys. Rev. B* **99**, 125120 (2019).
- [11] T. Mitsuhashi and H. Kumigashira *et al.*, *Phys. Rev. B* **94**, 125148 (2016).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計106件（うち査読付論文 106件／うち国際共著 17件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Kitamura Miho, Horiba Koji, Kobayashi Masaki, Sakai Enju, Minohara Makoto, Mitsuhashi Taichi, Fujimori Atsushi, Nagai Takuro, Fujioka Hiroshi, Kumigashira Hiroshi	4. 巻 108
2. 論文標題 Spatial distribution of transferred charges across the heterointerface between perovskite transition metal oxides LaNiO ₃ and LaMnO ₃	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 111603 ~ 111603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4944418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitamura Miho, Kobayashi Masaki, Sakai Enju, Minohara Makoto, Yukawa Ryu, Shiga Daisuke, Amemiya Kenta, Nonaka Yosuke, Shibata Goro, Fujimori Atsushi, Fujioka Hiroshi, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi	4. 巻 100
2. 論文標題 Relationship between charge redistribution and ferromagnetism at the heterointerface between the perovskite oxides LaNiO ₃ and LaMnO ₃	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245132[1-8]
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.100.245132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minohara Makoto, Kikuchi Naoto, Yoshida Yoshiyuki, Kumigashira Hiroshi, Aiura Yoshihiro	4. 巻 7
2. 論文標題 Improvement of the hole mobility of SnO epitaxial films grown by pulsed laser deposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry C	6. 最初と最後の頁 6332 ~ 6336
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/c9tc01297d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Harada T, Sugawara K, Fujiwara K, Kitamura M, Ito S., Nojima T, Horiba K, Kumigashira H, Takahashi T, Sato T, Tsukazaki A.	4. 巻 2
2. 論文標題 Anomalous Hall effect at the spontaneously electron-doped polar surface of PdCoO ₂ ultrathin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013282[1-6]
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.013282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Dai, E. Frantzeskakis, F. Fortuna, P. Lomker, R. Yukawa, M. Thees, S. Sengupta, P. Le Fevre, F. Bertran, J. E. Rault, K. Horiba, M. Muller, H. Kumigashira, and A. F. Santander-Syro	4. 巻 101
2. 論文標題 Tunable two-dimensional electron system at the (110) surface of SnO ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085121 [1-10]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.085121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yukawa R., Minohara M., Shiga D., Kitamura M., Mitsuhashi T., Kobayashi M., Horiba K., Kumigashira H.	4. 巻 97
2. 論文標題 Control of two-dimensional electronic states at anatase TiO ₂ (001) surface by K adsorption	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165428 [1-8]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.165428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. C. Rodel, J. Dai, F. Fortuna, E. Frantzeskakis, P. Le Fevre, F. Bertran, M. Kobayashi, R. Yukawa, T. Mitsuhashi, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, and A. F. Santander-Syro	4. 巻 2
2. 論文標題 High-density two-dimensional electron system induced by oxygen vacancies in ZnO	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 051601 (R) [1-7]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.051601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Anada Masato, Kowa Kazuhiro, Maeda Hiroki, Sakai Enju, Kitamura Miho, Kumigashira Hiroshi, Sakata Osami, Nakanishi-Ohno Yoshinori, Okada Masato, Kimura Tsuyoshi, Wakabayashi Yusuke	4. 巻 98
2. 論文標題 Spatial coherence of the insulating phase in quasi-two-dimensional LaNiO ₃ films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014105 [1-8]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.014105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minohara Makoto, Yukawa Ryu, Kitamura Miho, Kumai Reiji, Murakami Youichi, Kumigashira Hiroshi	4. 巻 500
2. 論文標題 Growth of antiperovskite oxide Ca ₃ SnO films by pulsed laser deposition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 33~37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2018.08.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shiga D., Minohara M., Kitamura M., Yukawa R., Horiba K., Kumigashira H.	4. 巻 99
2. 論文標題 Emergence of metallic monoclinic states of VO ₂ films induced by K deposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125120[1-7]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.125120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horiba Koji, Yukawa Ryu, Mitsunashi Taichi, Kitamura Miho, Inoshita Takeshi, Hamada Noriaki, Otani Shigeki, Ohashi Naoki, Maki Sachiko, Yamaura Jun-ichi, Hosono Hideo, Murakami Youichi, Kumigashira Hiroshi	4. 巻 96
2. 論文標題 Semimetallic bands derived from interlayer electrons in the quasi-two-dimensional electride Y ₂ C	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045101[1-5]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.045101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Masaki, Yoshimatsu Kohei, Mitsunashi Taichi, Kitamura Miho, Sakai Enju, Yukawa Ryu, Minohara Makoto, Fujimori Atsushi, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Emergence of Quantum Critical Behavior in Metallic Quantum-Well States of Strongly Correlated Oxides	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16621[1-7]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-16666-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okada Yoshinori, Shiao Shiu-Yuan, Chang Tay-Rong, Chang Guoqing, Kobayashi Masaki, Shimizu Ryota, Jeng Horng-Tay, Shiraki Susumu, Kumigashira Hiroshi, Bansil Arun, Lin Hsin, Hitosugi Taro	4. 巻 119
2. 論文標題 Quasiparticle Interference on Cubic Perovskite Oxide Surfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 086801 [1-6]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.086801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minohara M., Hikita Y., Bell C., Inoue H., Hosoda M., Sato H. K., Kumigashira H., Oshima M., Ikenaga E., Hwang H. Y.	4. 巻 7
2. 論文標題 Dielectric collapse at the LaAlO ₃ /SrTiO ₃ (001) heterointerface under applied electric field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9516 [1-7]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-09920-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Obata Yukiko, Yukawa Ryu, Horiba Koji, Kumigashira Hiroshi, Toda Yoshitake, Matsuishi Satoru, Hosono Hideo	4. 巻 96
2. 論文標題 ARPES studies of the inverse perovskite Ca ₃ PbO: Experimental confirmation of a candidate 3D Dirac fermion system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155109 [1-6]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.155109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堀場 弘司、組頭 広志	4. 巻 38
2. 論文標題 放射光特性を生かした角度分解光電子分光研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 表面科学	6. 最初と最後の頁 553 ~ 558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/jsss.j.38.553	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 組頭 広志	4. 巻 38
2. 論文標題 酸化物量子井戸構造に誘起される新奇な2次元電子液体状態	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 表面科学	6. 最初と最後の頁 596 ~ 601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1380/jsssj.38.596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Mitsuhashi, M. Minohara, R. Yukawa, M. Kitamura, K. Horiba, M. Kobayashi, and H. Kumigashira	4. 巻 94
2. 論文標題 Influence of k -broadening on ARPES spectra of the (110) and (001) surfaces of SrVO3 films	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 125148[1-8]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.125148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minohara Makoto, Kitamura Miho, Wadati Hiroki, Nakao Hironori, Kumai Reiji, Murakami Youichi, Kumigashira Hiroshi	4. 巻 120
2. 論文標題 Thickness-dependent physical properties of La1/3Sr2/3FeO3 thin films grown on SrTiO3 (001) and (111) substrates	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 025303 ~ 025303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4958670	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida T., Kobayashi M., Yoshimatsu K., Kumigashira H., Fujimori A.	4. 巻 208
2. 論文標題 Correlated electronic states of SrVO3 revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 J. Electron Spectr. Rel. Phenom.	6. 最初と最後の頁 11 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.elspec.2015.11.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Yukawa, K. Ozawa, S. Yamamoto, H. Iwasawa, K. Shimada, E. F. Schwier, K. Yoshimatsu, H. Kumigashira, H. Namatame, M. Taniguchi, and I. Matsuda	4. 巻 94
2. 論文標題 Phonon-dressed two-dimensional carriers on the ZnO surface	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 165313[1-5]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.165313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yukawa Ryu, Yamamoto Susumu, Akikubo Kazuma, Takeuchi Kaori, Ozawa Kenichi, Kumigashira Hiroshi, Matsuda Iwao	4. 巻 3
2. 論文標題 Tailoring Photovoltage Response at SrRuO ₃ /SrTiO ₃ Heterostructures	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Adv. Mater. Interf.	6. 最初と最後の頁 1600527 ~ 1600527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.201600527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Backes, T. C. Rodel, F. Fortuna, E. Frantzeskakis, P. Le Fevre, F. Bertran, M. Kobayashi, R. Yukawa, T. Mitsuhashi, M. Kitamura, K. Horiba, H. Kumigashira, R. Saint-Martin, A. Fouchet, B. Berini, Y. Dumont, A. J. Kim, F. Lechermann, H. O. Jeschke, M. J. Rozenberg, R. Valenti, and A. F. Santander-Syro	4. 巻 94
2. 論文標題 Hubbard band or oxygen vacancy states in the correlated electron metal SrVO ₃ ?	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B.	6. 最初と最後の頁 241110R[1-7]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.94.241110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計67件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 33件)

1. 発表者名 組頭 広志
2. 発表標題 放射光分光による酸化物表面・界面計測と新機能探索
3. 学会等名 第8回強制的秩序とその操作に関わる研究グループ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Horiba
2. 発表標題 Synchrotron-based ARPES study at VUV-SX combination beamline KEK-PF BL-2 MUSASHI
3. 学会等名 The first international workshop on Momentum Microscopy & Spectroscopy for Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 組頭広志
2. 発表標題 酸化物量子井戸構造を用いた低次元量子物質の開発
3. 学会等名 第2回固体化学フォーラム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 組頭広志
2. 発表標題 放射光解析に基づく量子物質開発 “Materials by design”
3. 学会等名 H29年度九州表面・真空研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Horiba
2. 発表標題 Synchrotron radiation ARPES study of emerging materials
3. 学会等名 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi KUMIGASHIRA
2. 発表標題 Breakdown of Fermi Liquid Behavior in the 2D Limit of Metallic Quantum Well States of Strongly Correlated Oxides
3. 学会等名 European Materials Research Society (E-MRS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Horiba
2. 発表標題 In Situ Synchrotron ARPES Study on Manganite Thin Films
3. 学会等名 The 7th Annual World Congress of Nano Science and Technology-2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 組頭広志
2. 発表標題 酸化物表面・界面評価と新機能探索
3. 学会等名 第56回セラミックス基礎科学討論会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 組頭広志
2. 発表標題 アンチペロブスカイト酸化物における電子機能探索
3. 学会等名 2017年度量子ビームサイエンスフェスタ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Horiba
2. 発表標題 In situ angle-resolved photoemission study on manganite thin films
3. 学会等名 EMN Croatia Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroshi KUMIGASHIRA
2. 発表標題 Novel two-dimensional electron liquid states in quantum well structures of strongly correlated oxides
3. 学会等名 New horizons on redox processes on oxide surfaces- advanced spectroscopies and beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 組頭広志
2. 発表標題 酸化物質子井戸構造に誘起される新奇な2次元電子液体状態
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroshi KUMIGASHIRA
2. 発表標題 Novel two-dimensional electron liquid states in quantum well structures of strongly correlated oxides
3. 学会等名 International symposium on revolutionary atomic-layer materials (招待講演)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 組頭広志	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 1570
3. 書名 「放射光を用いた薄膜の電子状態評価」:「薄膜作製応用ハンドブック」(権田 俊一監修)第3編 薄膜・表面・界面の分析・評価、第一章 薄膜・表面・界面の分析評価法、第六節 pp. 761-770	

1. 著者名 組頭広志	4. 発行年 2018年
2. 出版社 講談社サイエンティフィク	5. 総ページ数 221-229
3. 書名 「酸化物薄膜材料への応用」:高桑雄二編著「X線光電子分光法」、第五章 X線光電子分光法の応用、第三節	

1. 著者名 組頭広志	4. 発行年 2019年
2. 出版社 アグネ技術センター	5. 総ページ数 196-206
3. 書名 「酸化物ナノ構造の界面をみてその新奇物性を開拓する」:東北放射光施設推進会議推進室編集「放射光利用の手引き」、第四部 未来材料の開発・物質の新機能開拓への応用	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東北大学 多元物質科学研究所 ナノ機能物性化学研究分野 組頭研究室 http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/kumigashira/ 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設 組頭研究室 http://oxides.kek.jp 超薄膜から薄膜へ膜厚限界を打破 ~「バナジウムの異常な混合原子価」が導く絶縁体転移~ https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/20180402press(1).pdf 低い温度で作動する固体酸化物燃料電池のための極薄電解質膜の開発 http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/wp-content/uploads/2020/04/2020403_press_kumigashira.pdf ディラック線モードの直接観測に成功 - トポロジカル量子コンピューター基盤物質を発見 - http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2018/07/press20180731-02-AIMR.html トポロジカル物質中の新型粒子を発見-ディラック・ワイル粒子に次ぐスピンおよび 2 重ワイル粒子- http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/news_press/20190221/ ミラー対称性による 新型トポロジカル絶縁体を発見 -高効率電子デバイスの開発に光- https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/pressrelease20180111.pdf 新しい単原子シート「ポロフェン」の中に質量ゼロ粒子を発見 https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/2017/02/20/pressrelease20170220.pdf 北村未歩 博士研究員が2016年度 第11回 「ロレアル-ユネスコ女性科学者 日本奨励賞」を受賞 http://news.nihon-loreale.jp/csr/fwis/ceremony2016.php 北村未歩 博士研究員が応用物理学会 第7回女性研究者研究業績・人材育成賞(小館香椎子賞:研究業績部門(若手)部門)を受賞 https://www.jsap.or.jp/docs/kodate-award/recipient2016.pdf</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堀場 弘司 (HORIBA Koi) (10415292)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授 (82118)	
研究分担者	篠原 誠人 (MINOHARA Makoto) (70728633)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別助教 (82118)	H29年度4月国立研究開発法人産業技術総合研究所(主任研究員)へ異動
連携研究者	小林 正起 (KOBAYASHI Masaki) (30508198)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特任助教 (82118)	H28年度4月東京大学(准教授)へ異動
連携研究者	湯川 龍 (YUKAWA Ryu) (40759479)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究員 (82118)	R01年度11月大阪大学(助教)へ異動